# МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН В 21 - 22 ЦИКЛАХ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

*Е.В.Милецкий, Ю.А.Наговицын*

На интервале 1972-1997 гг. для величин напряженности поля пятен, взятых из Пулковской базы данных магнитных полей солнечных пятен, проведены исследования различных статистических характеристик (средних, стандартных отклонений, гистограмм и др.). Сравнение соответствующих значений этих характеристик для различных фаз 11-летнего цикла указывает на незначительные их различия и близость гистограмм к нормальному распределению.

Получена и исследована зависимость ежедневных суммарных площадей пятен от ежедневных средних напряженностей магнитных полей пятен.

Установлено, что более 95% величин среднемесячных напряженностей располагается в узком интервале значений 1750-2500 Гс. Получены оценки усредненных за месяц величин магнитного потока пятен и найдена его взаимосвязь с глобальным магнитным полем Солнца на уровне фотосферы.

В максимуме 11-летнего цикла магнитный поток может достигать усредненных за год значений $4\text{-}5 * 10^{22}$ Мкс. В отличие от вариаций магнитного потока, хорошо отражающих 11-летний цикл, вариации напряженности магнитного поля имеют повышения не только вблизи фаз максимумов 11-летних циклов, но и в промежутке между ними - на фазах спада или минимума.

Работа поддержана грантом РФФИ № 98-07-90372.

## Введение

Исследования магнитных полей солнечных пятен имеют достаточно долгую историю, берущую начало с пионерских исследований Хэйла и его сотрудников [1]. Важная роль в таких исследованиях всегда отводилась измерению величин магнитных полей в пятнах. До определенного времени считалось, что напряженность магнитных полей большинства пятен не превышает 2000 Гс, а для малых пятен она может достигать нижнего предела в 100 Гс [1]. В дальнейшем эти взгляды были существенно пересмотрены. В частности, многими исследователями было установлено [2-4], что даже в самых малых пятнах и порах напряженность поля не ниже 1000 Гс. Гораздо менее определенными являются результаты, касающиеся среднего значения напряженности поля в пятнах, а также распределения пятен по напряжённостям. Со времени работы [5], обобщающей только данные ранних и пересмотренных в дальнейшем измерений, выполнялись исследования главным образом отдельных пятен или очень малых выборок, не позволяющих сделать статистически достаточно надежные выводы.

К настоящему времени в Пулковской обсерватории накоплен многолетний материал ежедневных наблюдений магнитных полей солнечных пятен, на основе которого коллективом сотрудников Пулковской обсерватории создана Пулковская база данных магнитных полей солнечных пятен. Данные из этой базы были использованы в настоящей работе для проведения исследования различных статистических характеристик (средних, стандартных отклонений, распределений и др.) величин напряженности поля у пятен за эпоху 21-22 циклов солнечной активности.

## Обработка данных и результаты

Из Пулковской базы магнитных полей солнечных пятен были взяты данные о почти десяти тысячах пятен за 1972-1997 гг., для которых были измерены максимальные напряженности и полярности магнитного поля. Далее пятна были разделены на две группы в зависимо-

сти от их полярности (N или S), и все характеристики вычислялись для каждой группы отдельно. Первоначально они были вычислены для всего интервала наблюдений (ALL). Затем было выполнено три типа разбиения всего интервала на две части, каждая из которых охватывала приблизительно одинаковое число лет. В табл. 1 и на рис. 1 (для N полярностей), а также в табл. 2 и на рис. 2 (для S полярностей) приведены результаты

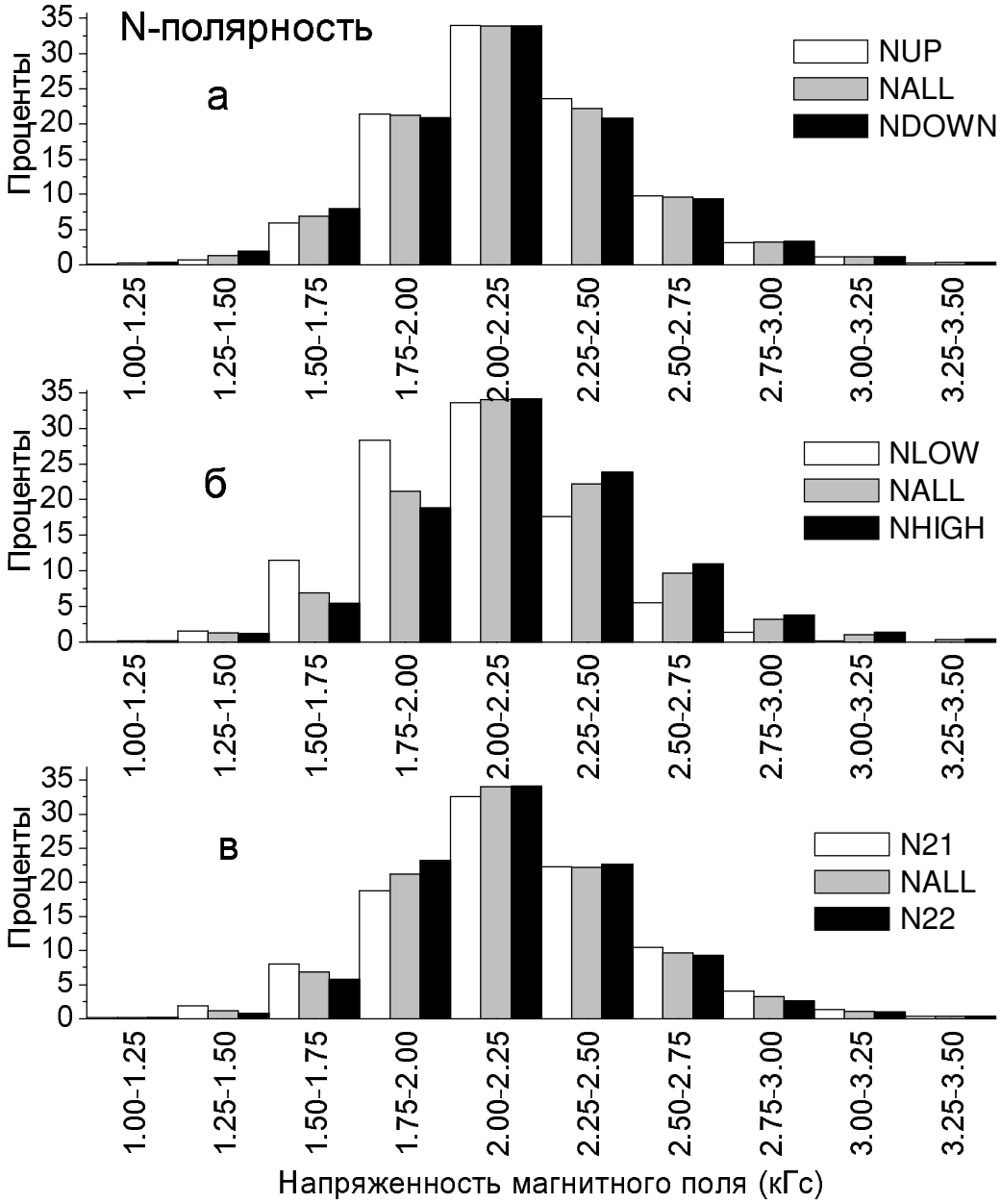


Рис. 1 Гистограммы напряженностей магнитных полей солнечных пятен N - полярности в различные эпохи солнечной активности: а)-роста активности, всего ряда, спада активности (соответственно белый (Б), серый (С) и черный (Ч) столбцы; б) - пониженной (Б) и повышенной (Ч) активности; в)- 21 (Б) и 22 (Ч) циклов.

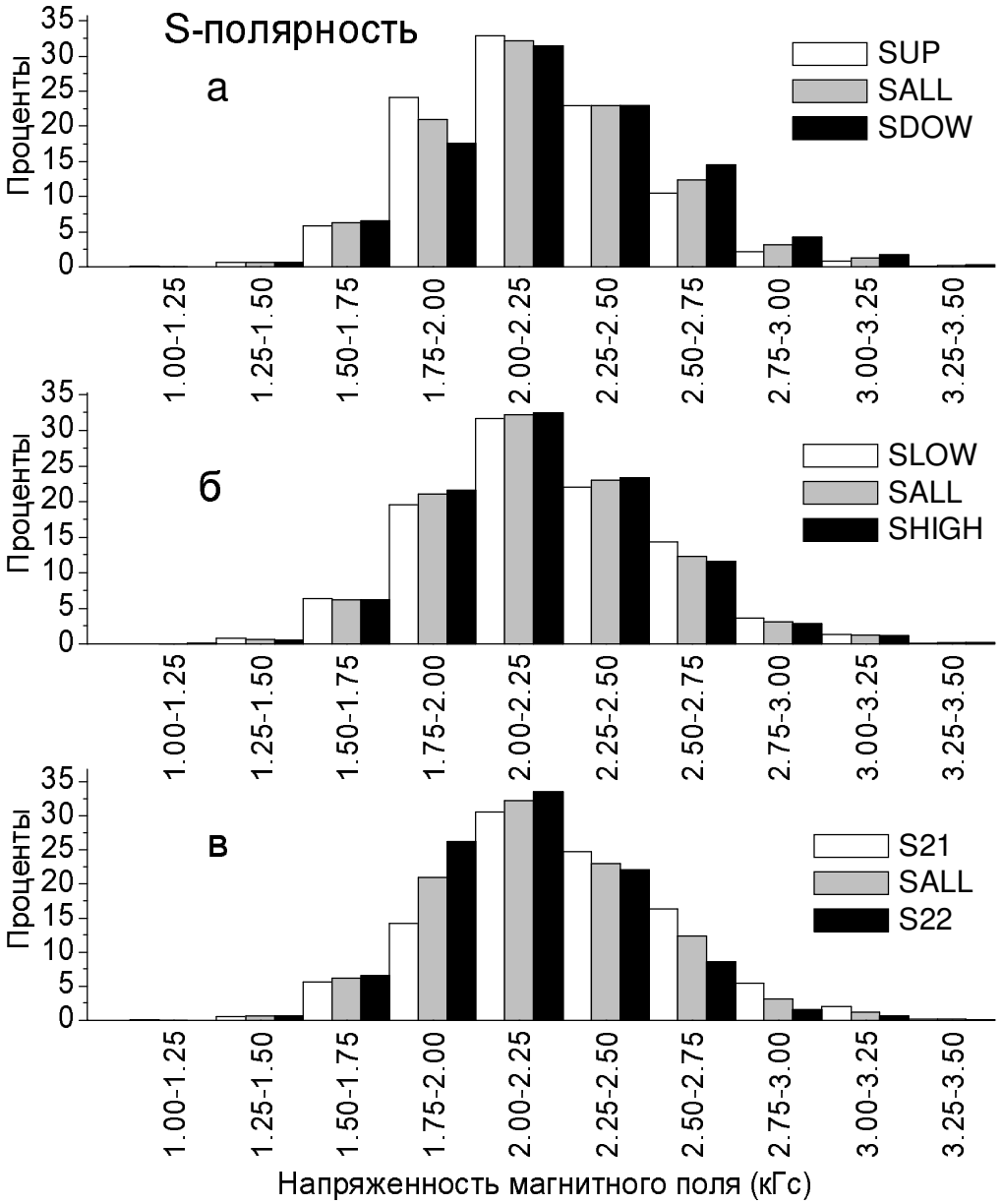


Рис. 2 Гистограммы напряженностей магнитных полей солнечных пятен S - полярности в различные эпохи солнечной активности: а)-роста активности, всего ряда, спада активности (соответственно белый (Б), серый (С) и черный (Ч) столбцы; б) - пониженной (Б) и повышенной (Ч) активности; в)- 21 (Б) и 22 (Ч) циклов.

вычисления статистических характеристик по интервалам: 21-го и 22-го циклов (1-й тип разделения), пониженного (LOW) и повышенного (HIGH) уровней активности (2-й тип) и ветвей роста (UP) и спада (DOWN) (3-й тип). Там же приведены годы соответствующих интервалов. Видно хорошее согласие гистограмм, полученных для различных интервалов (

**Таблица 1 (N-полярность)**

| Эпохи | ALL | 21 цикл | 22 цикл | LOW | HIGH | UP | DOWN |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Интервал (в годах)** | 1972-1997 | 1976-1985 | 1986-1995 | 1974-1977<br>1984-1987<br>1993-1997 | 1972-1973<br>1978-1983<br>1988-1992 | 1976-1980<br>1985-1990<br>1996-1997 | 1972-1975<br>1981-1984<br>1991-1995 |
| **Число Пятен** | 4592 | 1657 | 2536 | 1147 | 3445 | 2403 | 2189 |
| **Доля пятен 1.75-2.50 кГс** | 77% | 74% | 80% | 80% | 77% | 79% | 76% |
| **Доля пятен 2.50-3.50 кГс** | 14% | 16% | 13% | 7% | 17% | 14% | 14% |
| **Среднее (в Гс)** | 2158 | 2163 | 2161 | 2058 | 2191 | 2171 | 2143 |
| **Стандарт (в Гс)** | 323 | 351 | 305 | 290 | 326 | 308 | 338 |
| **Асимметрия** | 0.33 | 0.25 | 0.41 | 0.27 | 0.30 | 0.36 | 0.32 |
| **Эксцесс** | 0.67 | 0.47 | 0.78 | 0.28 | 0.74 | 0.54 | 0.72 |

**Таблица 2 (S-полярность)**

| Эпохи | ALL | 21 цикл | 22 цикл | LOW | HIGH | UP | DOWN |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Интервал (в годах)** | 1972-1997 | 1976-1985 | 1986-1995 | 1974-1977<br>1984-1987<br>1993-1997 | 1972-1973<br>1978-1983<br>1988-1992 | 1976-1980<br>1985-1990<br>1996-1997 | 1972-1975<br>1981-1984<br>1991-1995 |
| **Число Пятен** | 5062 | 1969 | 2828 | 1453 | 3609 | 2647 | 2415 |
| **Доля пятен 1.75-2.50 кГс** | 76% | 70% | 82% | 73% | 77% | 80% | 72% |
| **Доля пятен 2.50-3.50 кГс** | 17% | 24% | 11% | 20% | 16% | 13% | 21% |
| **Среднее (в Гс)** | 2184 | 2247 | 2135 | 2194 | 2180 | 2158 | 2213 |
| **Стандарт (в Гс)** | 318 | 343 | 287 | 325 | 315 | 297 | 337 |
| **Асимметрия** | 0.39 | 0.19 | 0.45 | 0.32 | 0.42 | 0.35 | 0.36 |
| **Эксцесс** | 0.38 | 0.12 | 0.66 | 0.16 | 0.48 | 0.43 | 0.24 |

белые и черные столбцы на рис.1 и 2), и гистограмм, полученных по всему ряду (серые столбцы на рис. 1 и 2). Сравнение вычисленных для них значений средних и среднеквадратических отклонений (стандартов) указывает на незначительные их различия в зависимости от интервала времени (эпохи). Только для пятен N-полярности значения средних и стандартов эпох повышенной активности значимо (с достоверностью более 99.9%) превышают соответствующие значения эпох пониженной активности (см. табл. 1). Однако для пятен S-полярности значимого различия нет. Более того, здесь наблюдается даже обратная картина. Сравнительный анализ позволяет сделать вывод о хорошей однородности данных, для которых значения среднего (2171 Гс) и стандарта (320 Гс), вычисленные по всей совокупности измерений, являются достаточно представительными её характеристиками.

Численная проверка полученных гистограмм (рис. 1 и 2) на соответствие гипотезе о нормальности их распределений указывает на небольшое, но значимое их отличие от "нормальности". Об этом свидетельствуют и заметные величины асимметрии и эксцесса (см. табл.1 и 2). Частично это можно объяснить наличием для значения напряженности нижнего порога в 1000 Гс, который, видимо, представляет собой минимальное значение, при котором еще могут образовываться пятна.

В табл. 1 и 2 приведены также доли пятен (в %), приходящиеся на диапазоны 1750-2500 Гс (он вносит наибольший вклад в соответствующие гистограммы) и 2500-3500 Гс (максимальные значения напряженностей). Полученные для разных эпох значения расположены в пределах 70-82% для диапазона 1750-2500 Гс и 7-21% для диапазона 2500-3500 Гс. Для сравнения с результатами работы [5] были вычислены доли пятен, имеющих напряженности более 2000 Гс. Их оказалось 70.5% и 72% соответственно для пятен N и S полярностей, что кардинально отличается от результатов, полученных в [5] (20% пятен с напряженностью > 2000 Гс). Аналогично для долей пятен с полем, большим 2500 Гс и 3000 Гс, у нас получились соответственно 14% и 1.4% для пятен N-полярности и 17% и 1.5% для пятен S-полярности (в [5] 11% и 5%).

На следующем этапе были вычислены средние за каждый день наблюдений в 1972-1997 гг. значения напряженностей магнитного поля без учета полярности. Затем для полученных 852-х значений была построена гистограмма их встречаемости (по числу дней), представленная на рис. 3. Гистограмма лучше согласуется с гипотезой о нормальном распределении, чем гистограммы на рис.1 и 2. Полученное значение среднего (2178 Гс) хорошо согласуется с приведенным выше. Однако среднеквадратическое отклонение (218 Гс), так же как диапазон значений напряженностей (1550- 2900 Гс), оказываются существенно меньше. При этом для 84% дней средние ежедневные значения напряженностей расположены в достаточно узком интервале 1850-2450 Гс.

На рис. 4 представлена зависимость ежедневных суммарных площадей пятен по диску от ежедневных средних напряженностей магнитных полей пятен за 852 дня наблюдений. Коэффициент корреляции этой зависимости невелик ( R=0.34), но все же значим с достоверностью более 99.9%. Из рассмотрения рис. 4 можно сделать вывод, что малым значениям площади могут соответствовать практически любые величины напряженности из интервала 1580-2900 Гс. А вот при возрастании площадей отчетливо проявляется тенденция к росту соответствующих напряженностей. На это указывают и линии, проведенные на рис. 4. Сплошная линия обозначает центры тяжести множества точек при изменении нижней границы учитываемых значений площадей пятен. Особенно хорошо тенденция роста прослеживается в расширении "зоны избегания" - области, находящейся левее проведенной на рис. 4 пунктирной прямой. Эта прямая показывает, что при значениях площадей, например, более 2000 м.д.п., 3000 м.д.п., 4000 м.д.п. и 5000 м.д.п. практически не встречаются дни с напряженностью поля соответственно менее 1800 Гс., 2000 Гс, 2100 Гс, и 230 Гс.

Нами была построена гистограмма для среднемесячных значений напряженности магнитного поля за эпоху 1976-1996 гг., представленная на рис. 5. Среднее значение оказалось равным 2165 Гс, что очень близко к значениям, полученным выше. В узком интервале 1750-

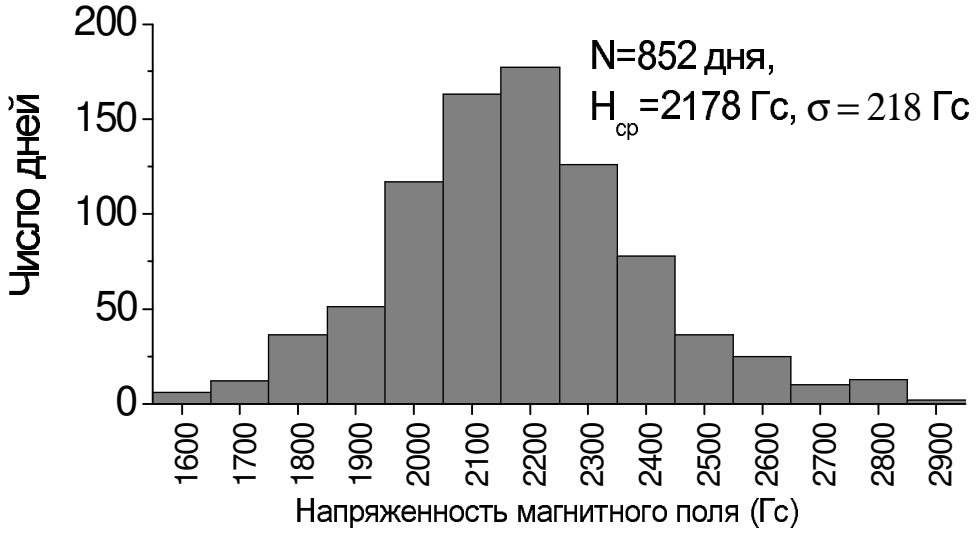


Рис. 3. Распределение встречаемости (по дням) ежедневных средни значений напряженностей магнитных полей в пятнах (в Гс) за 1972-1997 гг.

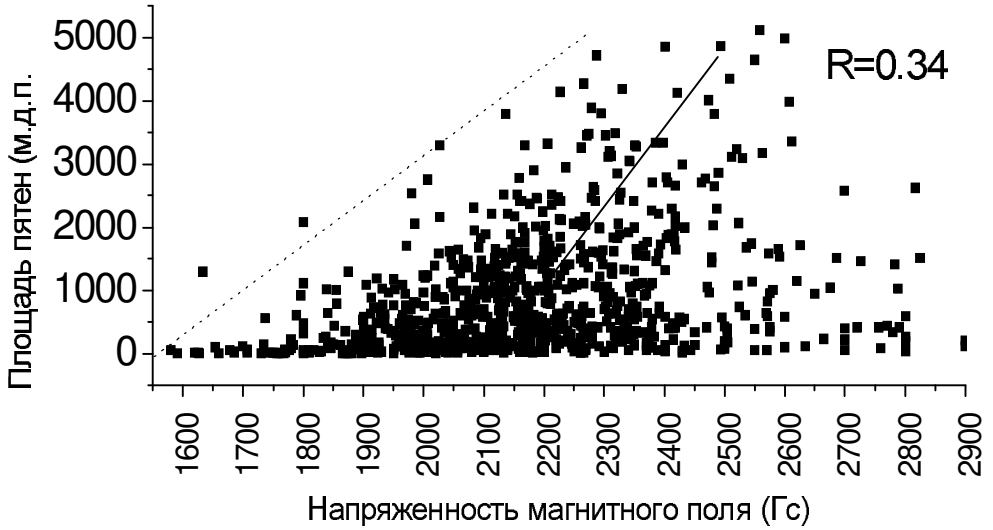


Рис. 4. Зависимость суммарной площади солнечных пятен (в м.д.п.) от величины напряженности магнитного поля в пятнах (в Гс)- (ежедневные значения). (Всего 852 дня за 1972-1997 гг.)

2500 Гс расположено подавляющее большинство среднемесячных значений напряженностей - 107 (96%) из 111.

Поскольку разброс среднемесячных значений напряженностей магнитного поля пятен мал, то, умножив их (с коэффициентом 0.4) на соответствующие среднемесячные значения площадей пятен (см., например, [1,7]), мы получили оценки среднемесячных величин магнитного потока пятен. На рис. 6 представлена зависимость среднемесячных значений индекса глобального магнитного поля на уровне фотосферы - BR1 (введен в [8]) от соответствующих значений магнитного потока пятен. Коэффициент линейной корреляции для этой зависимости довольно высок (0.73), хотя сам характер облака точек наводит на мысль о нелинейном характере зависимости. Во всяком случае, можно сделать вывод, что между магнитным потоком пятен и глобальным магнитным полем на уровне фотосферы существует взаим о-

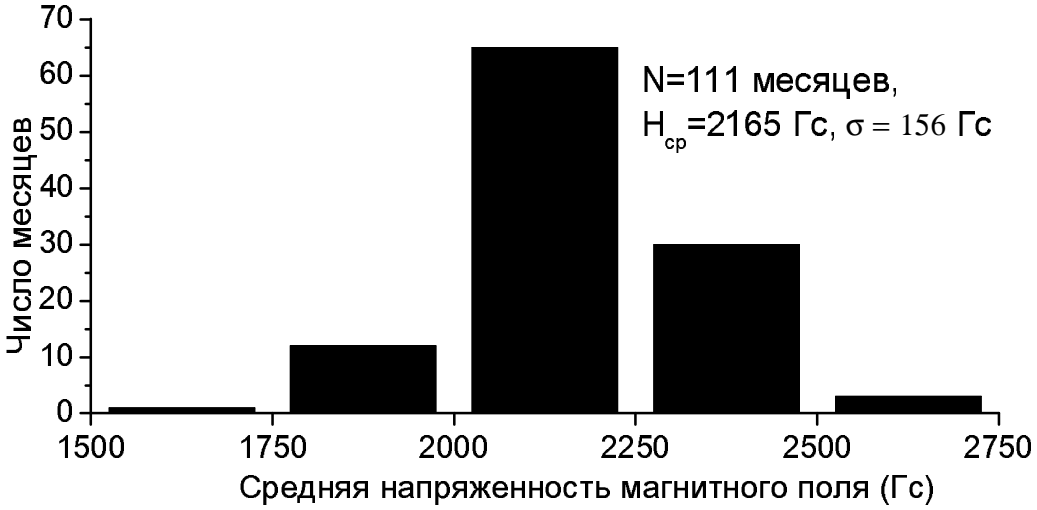


Рис. 5. Распределение встречаемости среднемесячных значений напряженностей магнитных полей в пятнах (в Гс) за 1976-1996 гг.

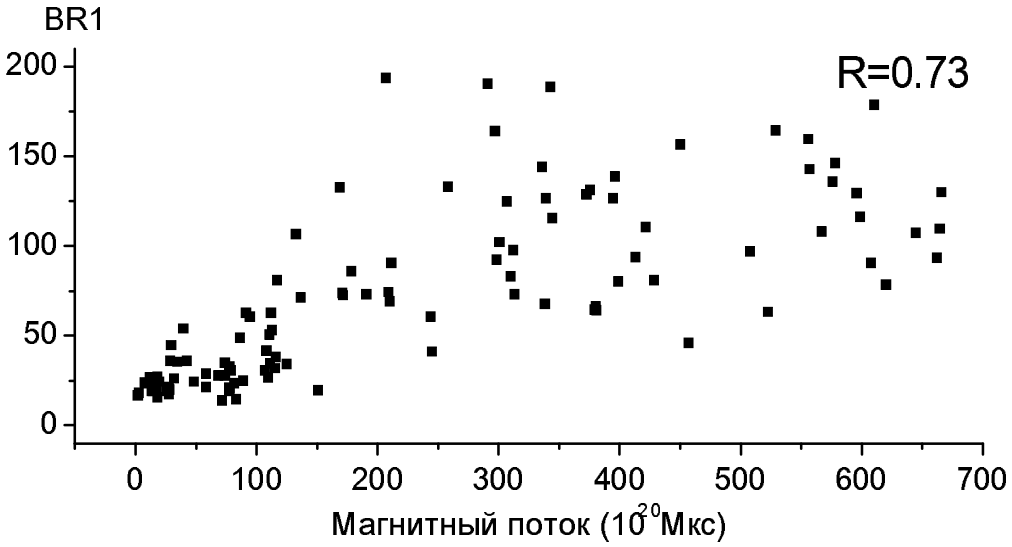


Рис. 6. Зависимость индекса глобального магнитного поля на уровне фотосферы (BR1) от значений магнитного потока пятен (среднемесячные значения). (111 месяцев за 1976-1996 гг.)

связь. В то же время большим величинам магнитного потока (5-7$*10^{22}$ Мкс) могут соответствовать как большие, так и весьма малые значения индекса BR1.

На рис.7а представлены графики временных вариаций(1976-1996 гг.) среднегодовых значений напряженностей пятен (без учета полярностей) и нижнего (25%) и верхнего (75%) квартилей соответствующих распределений. Таким образом, можно проследить за измен е-ниями от года к году напряженностей у 50% пятен. Видно, что происходятдовольно плавные изменения средних значений напряженностей в пределах от 1900 до 2300 Гс. Наблюдается также небольшое уменьшение "квартильного коридора" с течением времени. На рис.7б представлен график изменений среднегодовых величин магнитного потока пятен. Как видно,

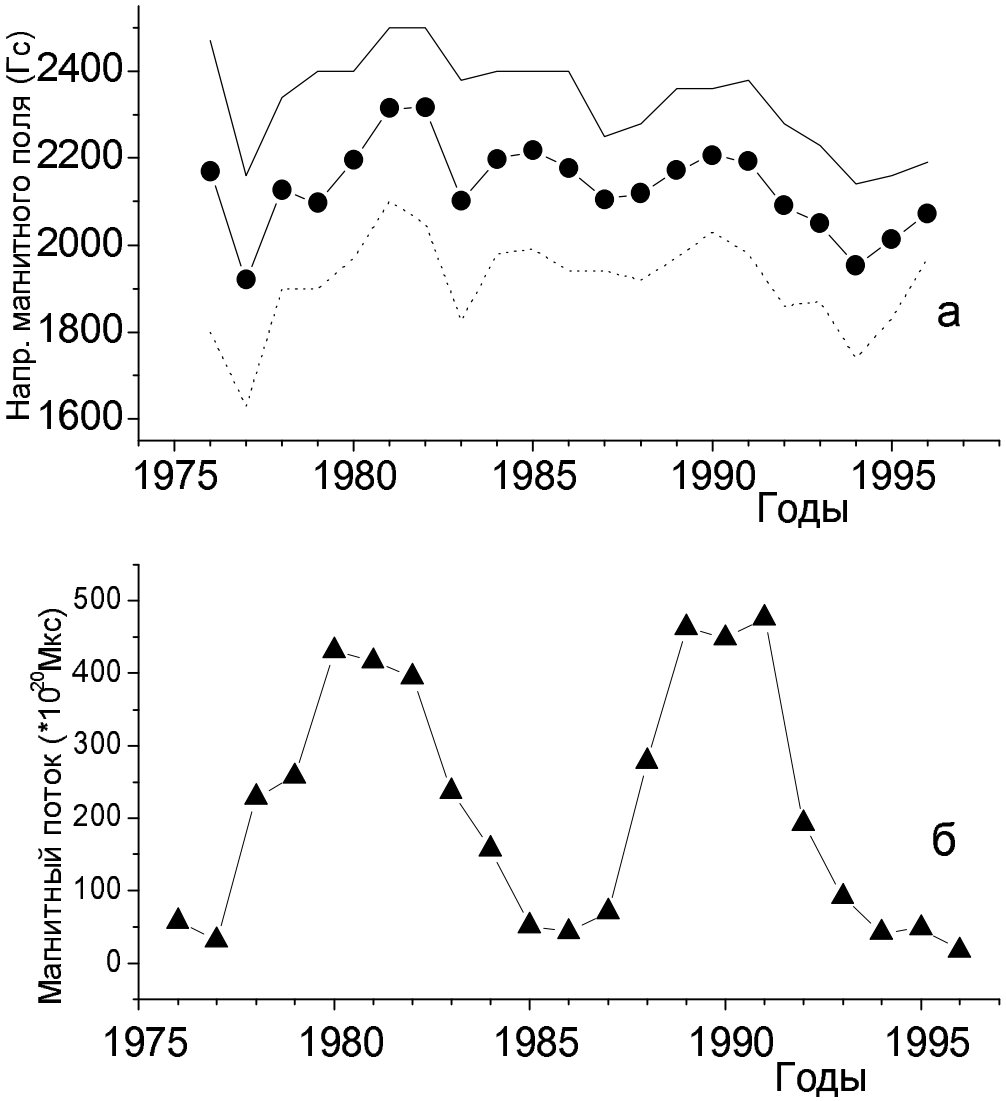


Рис. 7. Графики среднегодовых значений за 1976-1996 гг.: а) - напряженностей магнитных полей в пятнах и нижнего (25%) (штриховая кривая) и верхнего (75%) (сплошная кривая) квартилей их распределений; б) - величин магнитного поток от пятен.

он хорошо отражает 11-летний цикл. В годы максимумов магнитный поток может достигать значений $4\text{-}5 * 10^{22}$ Мкс. Возвращаясь к рис. 7а, следует отметить, что график напряженности магнитного поля имеет повышения не только вблизи фаз максимумов двух 11-летних циклов (что было бы легко объяснить связью с этими циклами), но и в промежутке между ними - на фазах спада и минимума. Возможно, в этом ряду существуют периодические изменения, отличные от 11-летних. Изучение более продолжительного ряда наблюдений (с 1957 г.) может помочь установить более определенные закономерности во временных вариациях среднегодовых напряженностей магнитных полей пятен.

## ЛИТЕРАТУРА


1. Брей Р., Лоухед Р. / Солнечные пятна. 1967. М. Мир. 384С.
2. Стешенко Н.В. / Известия КрАО. Т. 37. С. 21.
3. Bumba V. / Solar Phys. 1967. V. 1. P. 371.
4. Beckers J.M., Schroter E.H. / Solar Phys. V. 4. P. 142.
5. Bell B. / Smithson. Contr. Astrophys. 1960. V. 5. P. 17.
6. Вяльшин Г.Ф., Абрамов-Максимов В.Е., Иванов В.Г., Милецкий Е.В., Наговицын Ю.А. / Известия ГАО. 2000. № 213.
7. Обридко В.Н. / Солнечные пятна и комплексы активности. 1985. М. Наука. 286 с.
8. Obridko V.N., Shelting B.D./ Solar Phys.1992. V.137. P.167-177.